

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：17401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05492

研究課題名（和文）葉の力学的最適化過程における細胞平面充填の画像計測数理解析

研究課題名（英文）Imaging analysis on cell geometry during mechanical optimization in leaves

研究代表者

桧垣 匠（Higaki, Takumi）

熊本大学・大学院先端科学研究部（理）・教授

研究者番号：90578486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 44,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では葉の表皮細胞が湾曲してジグソーパズルのように変形する構造的意義を探るとともに、その人工構造物への応用を検討した。その結果、ジグソーパズル型の細胞形状は器官レベルでの局所的な成長量を緩衝することによって子葉の団扇型の形態形成に寄与する可能性が示唆された。また、細胞壁の湾曲パターンが人工構造物のジョイント構造に応用できる可能性が示唆された。加えて、シロイヌナズナの花茎や側枝など地上部の三次元形態を非破壊的に再構成し、側枝の角度分布および曲率を計測するシステムを開発した。本システムを用いてミオシンXI変異体の草姿の四次元解析を実施し、側枝の上向き成長にXI-Kが寄与することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、葉の細胞がなぜジグソーパズルのような形に変形するのか、その理由を探求した。研究の結果、この細胞の形が葉の形状を保つのに役立つ場合があることがわかった。この研究成果は、自然のデザインがどのように機能するかを理解する助けとなり、その知識を建築などの人工構造に応用する可能性が開かれた。また、私たちは草姿を立体的に再構成し、その成長を追跡する方法を開発した。これにより、特定の遺伝子が植物の成長にどのように影響を与えるかを理解することが可能になった。以上の成果は、自然のデザイン原理を理解し、それを実生活に適用することで、持続可能な社会を構築する手がかりを提供するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the structural significance of the jigsaw puzzle-like morphogenesis of leaf epidermal cells, and explored the potential application of the cell biological structure to artificial structures. Our analysis indicated that the jigsaw puzzle-like cell shape moderates local growth throughout the organ, which may affect the formation of the round fan-shaped morphology of the cotyledons. Furthermore, we found that the cell wall waving pattern observed in pavement cells could be applied to the structure of joints. We also developed an experimental system to non-destructively reconstruct the three-dimensional morphology of above-ground parts such as flower stems and lateral branches of *Arabidopsis thaliana*, and to measure the angular and curvature distribution of lateral branches. Using this system, we analyzed temporal changes in lateral branch morphology of myosin XI mutants, suggesting that myosin X contributes to the upward growth of lateral branches.

研究分野：植物細胞生物学

キーワード：ジョイント構造 継手 画像解析 葉表皮細胞 バイオイメージング

1. 研究開始当初の背景

植物の葉の表皮細胞は、発生初期はレンガを積み上げたような比較的単純な形状を呈している。ところが、葉の成長が進むにつれて、細胞壁が湾曲して細胞同士が噛み合うような形態へと変化する。この細胞形態変化に関わる遺伝子・タンパク質はこれまでに同定されていたが、それらがどのように相互作用して、形態変化を導いているのかについてはほとんど分かっていなかった。我々はこれまでに知られている植物細胞壁のリモデリングに関わる分子メカニズムをまとめて、「細胞壁の産生を抑制するシグナル因子が細胞壁内に放出されて、放出された点から一定の距離まで影響を及ぼす」というルールを導き出した。このルールを界面方程式とカーネルを用いて数理モデル化し、数値シミュレーションしたところ、細胞壁の湾曲形成を再現できることが判明した。また、細胞壁分解酵素処理あるいは細胞壁合成酵素変異により相対的に細胞壁の分解を促進した実際の細胞形状を観察し、画像解析技術により細胞形態を定量評価したところ、数理モデルで予測されたように細胞壁の湾曲の波長は長くなることが確認された (Higaki et al. 2016 *PLOS Comput Biol*)。さらに、細胞壁の力学的性質に基づく葉表皮細胞の力学モデルを構築し、細胞骨格が制御する細胞の異方成長に対する摂動の効果数を数理生物学的に説明することができた (Higaki et al. 2017 *Plant Cell Physiol*)。

上述のように、葉表皮細胞のジグソーパズル型細胞の形態形成機構は数理生物学的アプローチによっても研究が進展していた。ところが、細胞壁湾曲の構造学的意義には未だに不明な点も多く残されていた。直感的には、細胞同士が複雑に噛み合っているため、葉器官の力学的強度を保っている可能性も考えられたが、実験的な証拠には乏しい状況であった。一方、頭蓋骨の縫合線は、加齢に伴い徐々に湾曲することがよく知られており、理論のレベルでは上述の細胞壁の湾曲と同じメカニズムで湾曲が進行することが示唆されている (Miura et al. 2009 *J Anat*)。縫合線の湾曲の構造学的な意義として、やはり頭蓋骨の結合強度の増加が示唆されていたが、実際にヤギの頭蓋骨を用いた引張試験を実施した結果では、逆に湾曲している方が強度は低いことが示されている。ただし、湾曲している方が弾力性があり、衝撃吸収には向く可能性もある (Jaslow 1990 *J Biomech*)。

上述の研究の過程で我々は細胞壁の分解を促進した場合に葉表皮細胞形態のみならず、楕円形から扇形への子葉器官の形態変化に異常が生じることに気付いた。ある種の植物では、水流などの摂動に応じて分枝した棒状の形態になるなど葉形が大きく変化することが広く知られている。このような葉の柔軟な形態変化は植物の力学的最適化戦略の好例と言えるが、表皮細胞の形態形成との関連は不明瞭である。以上から、「植物の葉の表面を平面充填する表皮細胞の湾曲形状は、力学的・幾何学的制約の下で葉の柔軟な形態形成を実現させるために最適化された構造である」という本研究で検証を試みる仮説を着想するに至った。

2. 研究の目的

本領域において、本計画研究では細胞・組織レベルにおける植物構造の力学的最適化戦略を明らかにする。具体的には、葉表皮細胞の湾曲形成の構造力学的意義を、摂動に応じた葉器官の形態形成との関連から検証する。摂動に対する葉の力学的最適化過程における器官形態と細胞形態の変化を高効率・高精度に処理する画像解析技術を開発し、形態変化を定量的に記述する。また、数理モデリングなどの先端的画像研究法を駆使する。(項目 1 - 1) また、得られた知見に基づいて、葉表皮細胞同士の噛み合いを模した新しい継手(ジョイント)構造の創造など、建築学分野への応用を目指し、サステナブル構造システムの基盤創成の一翼を担う(項目 1 - 2)。これらにより葉表皮組織の細胞形態および力学的性質の変化を明らかにし、細胞形態変化の構造学的意義に迫る。

加えて、本領域の統一課題である「重力応答」に対しても画像解析技術を駆使した研究を展開し、サステナブル構造システムの解明に寄与する。具体的には、植物地上部画像からの樹形構造特徴の定量評価(項目 2 - 1)、重力感受細胞における細胞内構造動態の定量評価(項目 2 - 2)を実施する。

3. 研究の方法

下記、研究項目ごとに研究手法を述べる。

(項目 1 - 1) シロイヌナズナ子葉を材料に各種の顕微鏡学的解析、顕微鏡画像解析に基づく形態計測解析、細胞壁の成分分析(本領域・小竹班との共同研究)、数理モデル解析(九州大学・今村助教との共同研究)を実施した。

(項目 1 - 2) シロイヌナズナ子葉における表皮細胞構造を模したパターンを作成し、力学的試験に供した。本研究は本領域・川口班を中心とする共同研究チームにより実施された。

(項目 2 - 1) シロイヌナズナの地上部の三次元構造を非破壊的かつ経時的に取得するシステムを構築した。本研究は研究分担者である國田准教授を中心とした研究チームで推進した。

(項目2-2) シロイヌナズナの根における重力応答関連因子の細胞内局在を画像解析により定量的に評価した。本領域・森田班を中心とする共同研究チームにより実施された。

4. 研究成果

(項目1-1)

子葉表皮細胞の形態形成解析において、我々は新たな技術開発を行った。具体的には、表皮細胞の立体構造を時間経過とともに定量的に評価できるVR観察系(Higaki and Mizuno 2020)と、金属顕微鏡と深層学習を基盤にした葉表皮細胞形態の追跡実験系(Kikukawa et al. 2021, 檜垣と渡辺 2021)である。これらの技術を活用し、*RIC1* 過剰発現株の敷石細胞が子葉器官の形態形成にどの程度関与しているかを検討した。その結果、*RIC1* 過剰発現株では敷石細胞の表層微小管および細胞壁の量が変化し、通常の平面的な細胞成長様式ではなく、直線的な細胞伸長が観察された。また、*RIC1* 過剰発現株の子葉は子葉の辺縁部に凹凸を持つ異常な形状を示した。これらの観察結果に基づき、細胞形態とその集合体である器官の形態の関係を探るための数理モデルを構築した。数理モデルによる検討の結果、敷石細胞の伸長が子葉の異常な形状の形成に影響を及ぼしていることが明らかとなった。これは、ジグソーパズル型の敷石細胞が多方向への伸長により、子葉の丸い団扇型の器官形状を維持しつつ、効率的な平面拡大成長を可能にしている可能性を示唆している(Kikukawa et al. in revision.)。この研究成果は、「植物の葉の表面を平面充填する表皮細胞の湾曲形状は、力学的・幾何学的制約の下で葉の柔軟な形態形成を実現させるために最適化された構造である」という仮説を支持するものと考えられる。

【発表論文】

Higaki T, Mizuno H (2020) Four-dimensional imaging with virtual reality to quantitatively explore jigsaw puzzle-like morphogenesis of *Arabidopsis* cotyledon pavement cells. *Plant Biotech* 37: 429-435. (Published: 05 Sep 2020) <http://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.20.0605a>

Kikukawa K, Yoshimura K, Watanabe A, Higaki T (2021) Metal-nano-ink coating for monitoring and quantification of cotyledon epidermal cell morphogenesis. *Front Plant Sci* 12: 745980. (Published: 21 Sep 2021) <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.745980>

Kikukawa K, Takigawa-Imamura H, Soga K, Kotake T, Higaki T Smooth elongation of pavement cells induced by *RIC1* overexpression leads to marginal protrusions of the cotyledon in *Arabidopsis thaliana*. *in revision*.

檜垣匠、渡辺明 (2021) 金属顕微鏡による子葉表皮細胞の経時観察手法の開発 日本建築学会大会学術講演梗概集

菊川琴美 (2023) 熊本大学大学院自然科学教育部 修士論文

(項目1-2)

シロイヌナズナの葉の表皮細胞が成長する過程で、細胞間の境界線が複雑化し、ジグソーパズルのような形状を形成する現象は、力学的に有利で、葉の形状を保つ可能性が考えられている。その理論を基に、このジグソーパターンを木造建築の継ぎ手に応用し、伝統的な継ぎ手と比較するための引張試験を実施した。その結果、ジグソーパターン継ぎ手は鎌継ぎよりも引張強度に優れるが、蟻組継ぎには劣ることが示唆された。さらに、鎌継ぎが最大荷重を超えると急激に荷重が下降するのに対し、ジグソーパターン継ぎ手の荷重の下降はゆるやかで、強度だけでなく靱性にも優れていることが示された。また、ジグソーパターン継ぎ手の中でも、抽出部分や倍率により最大荷重が大きく異なることが確認され、継ぎ手部分の長さが大きくなるにつれて最大荷重も大きくなることが示唆された。以上の結果から、シロイヌナズナの葉の表皮細胞が形成するジグソーパターンを応用した継ぎ手は、鎌継ぎと比較して引張強度と靱性に優れていることが明らかになった(堀口 2020)。また、本領域・岩元班との協働により、葉表皮細胞の力学シミュレーションに関する知見をまとめて総説論文として発表した(Kikukawa et al. 2021)。

【発表論文】

堀口翔太, 川口健一, 有本清香, 中楚洋介, 檜垣匠, 出村拓 (2020) 植物の葉細胞にみられるジグソーパターンの継ぎ手への直接的応用と在来継ぎ手形状との比較 日本建築学会大会学術講演梗概集

Kikukawa K, Sato R, Iwamoto M, Higaki T (2021) Wide-range segmentation of cotyledon epidermal cells for morphometrical analysis and mechanical simulation. *Cytologia* 86: 189-194. (Published: 25 Sep 2021) <https://doi.org/10.1508/cytologia.86.189>

(項目2-1)

シロイヌナズナの地上部を高精度に立体再構成することを目的として、回転台の上で低速回転するシロイヌナズナを固定カメラにより複数方向から撮影し、視体積交差法に基づいて草姿を立体再構築するシステムを開発した(Kunita et al. 2021, 國田ら 2021, 檜垣 2022)。本システムは比較的安価かつ小スペースで構築することができるため、植物科学を専門とする研究室でも容易に導入できる。実際、本領域の森田班・出村班へ導入できた。また、非接触かつ非破壊的

な手法のため、成長段階を追った経時的な立体情報取得も可能である。3D プリンタで作成した大きさと形状が既知の立体模型を用いて立体再構成精度を検証したところ、十分な再構成精度があることも確認された。このため、本システムはシロイヌナズナ草姿のデジタルアーカイブと定量解析に資するシステムと位置付けられる。また、本領域・上田班と協働し、本システムを活用して姿勢制御変異体として単離されたミオシン XI 変異体の解析を進めた。その結果、ミオシン XI 変異体では側枝の上向きの成長が抑制されることが定量的に示された (吉田 2023)。

【発表論文】

- Kunita I, Morita MT, Toda M, Higaki T (2021) A three-dimensional scanning system for digital archiving and quantitative evaluation of Arabidopsis plant architectures. *Plant Cell Physiol* 62: 1975-1982. (Published: 22 May 2021) <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab068>
- 國田樹、金城愛梨、戸田真志、檜垣匠 (2021) 「シロイヌナズナ草姿の立体再構成」*Plant Morphology* 33: 67-69.
- 檜垣匠 (2022) モデル植物シロイヌナズナの草姿の立体再構成 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 吉田大一 (2023) 熊本大学大学院自然科学教育部 修士論文

(項目 2 - 2)

本領域・森田班との共同研究として、蛍光標識された重量応答関連因子 LAZY の細胞内局在の重力刺激に応答した変化を定量的に評価した (Nishimura et al. 2023)。本解析結果を含む一連の研究結果から、平衡石としてはたらくアミロプラスト近傍に局在する LAZY が重力方向の細胞膜に偏在化することで重力方向が感知されている可能性が示唆された。

【発表論文】

- Nishimura T, Mori S, Shikata H, Nakamura M, Hashiguchi Y, Abe Y, Haguhara T, Yoshikawa H, Toyota M, Higaki T, Terao-Morita M (2023) Cell polarity linked to gravity sensing is generated by protein translocation from statoliths to the plasma membrane. *bioRxiv* <https://doi.org/10.1101/2023.03.31.534658>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 19件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Sakai Y, Higaki T, Ishizaki K, Nishihama R, Kohchi T, Hasezawa S | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Migration of prospindle before the first asymmetric division in germinating spore of <i>Marchantia polymorpha</i> . | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Plant Biotech | 6. 最初と最後の頁 5-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5511/plantbiotechnology.21.1217b | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Suzuki R, Yamada M, Higaki T, Aida M, Kubo M, Tsai AY, Sawa S | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 PUCHI regulates giant cell morphology during root-knot nematode infection in <i>Arabidopsis thaliana</i> . | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Front Plant Sci | 6. 最初と最後の頁 755610 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.755610 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kikukawa K, Yoshimura K, Watanabe A, Higaki T | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Metal-nano-ink coating for monitoring and quantification of cotyledon epidermal cell morphogenesis. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Front Plant Sci | 6. 最初と最後の頁 745980 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.745980 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kamon E, Noda C, Higaki T, Demura T, Ohtani M | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 Calcium signaling contributes to xylem vessel cell differentiation via post-transcriptional regulation of VND7 downstream events. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Biotech | 6. 最初と最後の頁 331-337 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5511/plantbiotechnology.21.0519a | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Fujihara R, Uchida N, Tameshige T, Kawamoto N, Hotokezaka Y, Higaki T, Simon R, Torii KU, Tasaka M, Aida M | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 The boundary-expressed EPIDERMAL PATTERNING FACTOR-LIKE2 gene encoding a signaling peptide promotes cotyledon growth during Arabidopsis thaliana embryogenesis. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Biotech | 6. 最初と最後の頁 317-322 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.21.0508a | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Sato F, Iba K, Higaki T | 4. 巻 86 |
| 2. 論文標題 Involvement of the membrane trafficking factor PATROL1 in the salinity stress tolerance of Arabidopsis thaliana. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Cytologia | 6. 最初と最後の頁 119-126 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1508/cytologia.86.119 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Kimura T, Haga K, Nomura Y, Higaki T, Nakagami H, Sakai T | 4. 巻 187 |
| 2. 論文標題 The phosphorylation status of NPH3 affects photosensory adaptation during the phototropic response. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Physiol | 6. 最初と最後の頁 981-995 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plphys/kiab281 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Matsumoto H, Kimata Y, Higaki T, Higashiyama T, Ueda M | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Dynamic rearrangement and directional migration of tubular vacuoles are required for the asymmetric division of the Arabidopsis zygote. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Cell Physiol | 6. 最初と最後の頁 1280-1289 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcab075 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kunita I, Morita MT, Toda M, Higaki T | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 A three-dimensional scanning system for digital archiving and quantitative evaluation of Arabidopsis plant architectures. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Cell Physiol | 6. 最初と最後の頁 1975-1982 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcab068 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Higaki T, Akita K, Hasezawa S | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Elevated CO2 promotes satellite stomata production in young cotyledons of Arabidopsis thaliana. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Genes Cells | 6. 最初と最後の頁 475-482 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gtc.12773 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Yoshimi Y, Hara K, Yoshimura M, Tanaka N, Higaki T, Tsumuraya Y, Kotake T | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Expression of a fungal exo- α -1,3-galactanase in Arabidopsis reveals a role of type II arabinogalactans in the regulation of cell shape. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 J Exp Bot | 6. 最初と最後の頁 5414-5424 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jxb/eraa236 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Higaki T, Mizuno H | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Four-dimensional imaging with virtual reality to quantitatively explore jigsaw puzzle-like morphogenesis of Arabidopsis cotyledon pavement cells. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Plant Biotech | 6. 最初と最後の頁 429-435 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.20.0605a | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|------------------|
| 1. 著者名 Kimata Y, Higaki T, Kurihara D, Ando N, Matsumoto H, Higashiyama T, Ueda M | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Mitochondrial dynamics and segregation during the asymmetric division of Arabidopsis zygotes. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Quant Plant Biol | 6. 最初と最後の頁 e3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/qpb.2020.4 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Lu YJ, Li P, Shimono M, Corrion A, Higaki T, He SY, Day B | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Arabidopsis calcium-dependent protein kinase 3 regulates actin cytoskeleton organization and immunity. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nat Commun | 6. 最初と最後の頁 6234 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20007-4 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Higaki T, Akita K, Katoh K | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Coefficient of variation as an image-intensity metric for cytoskeleton bundling. | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Sci Rep | 6. 最初と最後の頁 22187 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79136-x | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Maeda K, Higaki T | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Disruption of actin filaments delays accumulation of cell plate membranes after chromosome separation. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plant Sig Behav | 6. 最初と最後の頁 1873586 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15592324.2021.1873586 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Ishida T, Yoshimura H, Takekawa M, Higaki T, Ideue T, Hatano M, Igarashi M, Tani T, Sawa S, Ishikawa H. | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Discovery, characterization and functional improvement of kumamonamide as a novel plant growth inhibitor that disturbs plant microtubules. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Sci Rep | 6. 最初と最後の頁 6077 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85501-1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kwon Seung-Hae, Wi Taemin, Park Yong Il, Kim Min Woo, Lee Gibok, Higaki Takumi, Choi Jung Hoon, Lee Ruda | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Noninvasive Early Detection of Calpain 2-Enriched Non-Small Cell Lung Cancer Using a Human Serum Albumin-Bounded Calpain 2 Nanosensor | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Bioconjugate Chemistry | 6. 最初と最後の頁 803 ~ 812 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.bioconjchem.9b00870 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Maeda Keisho, Sasabe Michiko, Hanamata Shigeru, Machida Yasunori, Hasezawa Seiichiro, Higaki Takumi | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Actin Filament Disruption Alters Phragmoplast Microtubule Dynamics during the Initial Phase of Plant Cytokinesis | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Plant and Cell Physiology | 6. 最初と最後の頁 445 ~ 456 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcaa003 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Hirai Risaku, Higaki Takumi, Takenaka Yuto, Sakamoto Yuki, Hasegawa Junko, Matsunaga Sachihito, Demura Taku, Ohtani Misato | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 The Progression of Xylem Vessel Cell Differentiation is Dependent on the Activity Level of VND7 in Arabidopsis thaliana | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Plants | 6. 最初と最後の頁 39 ~ 39 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plants9010039 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Wong Jeh Haur, Kato Takehide, Belteton Samuel A., Shimizu Rie, Kinoshita Nene, Higaki Takumi, Sakumura Yuichi, Szymanski Daniel B., Hashimoto Takashi | 4. 巻 181 |
| 2. 論文標題 Basic Proline-Rich Protein-Mediated Microtubules Are Essential for Lobe Growth and Flattened Cell Geometry | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Plant Physiology | 6. 最初と最後の頁 1535 ~ 1551 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.19.00811 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Nakamasu Akiko, Higaki Takumi | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 Theoretical models for branch formation in plants | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plant Research | 6. 最初と最後の頁 325 ~ 333 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-019-01107-9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Hirakawa Y, Hasezawa S, Higaki T | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 Reactive oxygen species production and stimulated endocytosis in tobacco BY-2 cells treated with Erwinia carotovora culture filtrate | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Cytologia | 6. 最初と最後の頁 289-293 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1508/cytologia.83.289 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Akita K, Hasezawa S, Higaki T | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Cortical microtubules and fusicoccin response in clustered stomatal guard cells induced by sucrose solution immersion | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Plant Signaling and Behavior | 6. 最初と最後の頁 1454815 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15592324.2018.1454815 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Takatsuka H, Higaki T, Umeda M | 4. 巻 178 |
| 2. 論文標題 Actin reorganization triggers rapid cell elongation in Arabidopsis roots | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Plant Physiology | 6. 最初と最後の頁 1130-1141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.18.00557 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Hirano T, Konno H, Takeda S, Dolan L, Kato M, Aoyama T, Higaki T, Takigawa-Imamura H, Sato MH | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 PtdIns(3,5)P2 mediates root hair shank hardening in Arabidopsis | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nature Plants | 6. 最初と最後の頁 888-897 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41477-018-0277-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Yi-Lun Tsai A, Higaki T, Nguyen CN, Perfus-Barbeoch L, Favery B, Sawa S | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Regulation of root-knot nematode behavior by seed coat mucilage-derived attractants | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Molecular Plant | 6. 最初と最後の頁 99-112 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.molp.2018.11.008 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Miyoshi S, Kimura S, Otsuki R, Higaki T, Nakamasu A | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Developmental analyses of divarications in leaves of an aquatic fern <i>Microsorium pteropus</i> and its varieties | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 PLOS One | 6. 最初と最後の頁 e0210141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0210141 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kimata Y, Kato T, Higaki T, Kurihara D, Yamada T, Segami S, Morita MT, Maeshima M, Hasezawa S, Higashiyama T, Tasaka M, Ueda M | 4. 巻 116 |
| 2. 論文標題 Polar vacuolar distribution is essential for accurate asymmetric division of Arabidopsis zygotes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America | 6. 最初と最後の頁 2338-2343 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1814160116 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Akita K, Higaki T | 4. 巻 144 |
| 2. 論文標題 An induction system for clustered stomata by sugar solution immersion treatment in Arabidopsis thaliana seedlings | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Visualized Experiments | 6. 最初と最後の頁 e58951 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3791/58951 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Nagashima A, Higaki T, Koeduka T, Ishigami K, Hosokawa S, Watanabe H, Matsui K, Hasezawa S, Touhara K | 4. 巻 294 |
| 2. 論文標題 Transcriptional regulators involved in responses to volatile organic compounds in plants | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry | 6. 最初と最後の頁 2256-2266 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1074/jbc.RA118.005843 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Tanaka M, Fujii Y, Hirano K, Higaki T, Nagasaki A, Ishikawa R, Okajima T, Katoh K | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Fascin in lamellipodia contributes to cell elasticity by controlling the orientation of filamentous actin | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Genes to Cells | 6. 最初と最後の頁 202-213 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gtc.12671 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 4件）

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 檜垣 匠 |
| 2. 発表標題 植物細胞生物学を起点とした画像の定量評価と機械学習 |
| 3. 学会等名 第30回日本バイオイメーjing学会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takumi Higaki |
| 2. 発表標題 Three-dimensional reconstruction of Arabidopsis plant architecture. |
| 3. 学会等名 Special Satellite Event “Plant Structure Optimization” in the 7th International Conference of Plant Cell Wall Biology（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 視体積交差法による植物形態の立体再構成と計測 |
| 3. 学会等名 日本植物学会第84回大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 画像解析技術の援用による植物細胞骨格研究 |
| 3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菊川琴美、檜垣匠 |
| 2. 発表標題 微小管結合タンパク質RIC1 過剰発現による子葉器官および表皮細胞の形態変化 |
| 3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉田大一、Liu Bo、檜垣匠 |
| 2. 発表標題 シロイヌナズナ子葉敷石細胞における微小管構造特徴と細胞形態の関係 |
| 3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森祥伍, 中村守貴, 押田龍一郎, 四方明格, 西村岳志, 古谷将彦, 檜垣匠, 森田(寺尾)美代 |
| 2. 発表標題 重力感受細胞におけるLZY タンパク質のライブイメージング |
| 3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Higaki Takumi |
| 2. 発表標題 Plasma membrane delivery of H ⁺ -ATPase for stomatal response. |
| 3. 学会等名 International Symposium 'Mechanisms of plant perception: from the endogenous to the exogenous' (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 電子顕微鏡画像解析による生物微細構造の検出と認識 |
| 3. 学会等名 公益社団法人日本顕微鏡学会第62回シンポジウム「AIを用いた顕微イメージングの将来～科学技術から物理化学，そして生命科学への貢献～」(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Higaki Takumi |
| 2. 発表標題 Three-dimensional imaging and morphometry of large vacuole regeneration in plant cultured cells. |
| 3. 学会等名 Workshop in the 42nd Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan “The vacuole/lysosome; Where does it come from, how is it maintained and what does it do in the cell?” (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 生物画像の定量・分類・認識 |
| 3. 学会等名 第67回日本生態学会大会シンポジウム「植物フェノタイピング：表現型データの定量化，モデル化とその自動化をもう一度考える」(招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 ジグソーパズル型葉表皮細胞の力学的最適化戦略を探索 |
| 3. 学会等名 第60回日本植物生理学会年会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 檜垣匠 |
| 2. 発表標題 植物細胞の形態形成機構の理解に向けたイメージングと画像解析 |
| 3. 学会等名 日本植物学会第82回大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takumi Higaki |
| 2. 発表標題 Bioimage clustering and classification |
| 3. 学会等名 KAIST-KU Joint Symposium 2018（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>Mapping 4D cell models with VR https://www.leica-microsystems.com/science-lab/mapping-4d-cell-models-with-vr/ AIを活用した植物細胞形状の追跡計測技術の開発 https://www.kumamoto-u.ac.jp/whatsnew/sizen/20210921 熊本大学ニュース：熊本大学『フィロソフィアの扉』第31回「国際先端科学技術研究機構」 https://www.youtube.com/watch?v=4Nr4uK-WAH4 細胞の骨組みの状態を高感度に測る技術を開発 https://www.kumamoto-u.ac.jp/whatsnew/sizen/20201221 EurekaAlert! Science News Releases https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2021-01/ku-ahs011421.php</p> |
|--|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 加藤 壮英 (KATO TAKAHIDE) (70379535) | 奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (14603) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 國田 樹 (KUNITA ITSUKI) (20645478) | 琉球大学・工学部・准教授 (18001) | |

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|-----------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | オリビエ ハマント (Olivier Hamant) | | |
| 研究協力者 | 今村 寿子 (IMAMURA HISAKO) | | |
| 研究協力者 | 戸田 真志 (TODA MASASHI) | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |